

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Геологический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Декан Геологического факультета
академик

_____/Д.Ю.Пушаровский/
«__» _____ 20 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Геохимия стабильных изотопов

Авторы-составители: Поляков В.Б., Борисов М.В.

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

05.04.01 Геология

Направленность (профиль) ОПОП:

Геохимия

Магистерская программа:

Геохимия

Форма обучения:

Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методическим Советом Геологического факультета
(протокол № _____, _____)

Москва 20__

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Геология» (*программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки*) в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г.

Год (годы) приема на обучение – 2019.

© Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения факультета.

Цель и задачи дисциплины

Цель – обеспечение подготовки магистров в области использования методов геохимии стабильных изотопов для исследования природных процессов.

Задачи: знакомство с основными закономерностями фракционирования стабильных изотопов, освоение методов применения стабильных изотопов для исследования широкого круга геохимических процессов на основе современных теоретических и методических представлений и практических примеров решения геохимических задач.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО – вариативная часть, блок дисциплин профессиональный, тип – дисциплина по выбору (модуль «Геохимия»), 1 г/о, семестр 2.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

Перечень дисциплин, которые должны быть освоены до начала освоения данной дисциплины: Информатика, Общая химия, Физическая химия, Неорганическая химия, Общая физика, Минералогия, Кристаллохимия, Петрология, Генезис месторождений полезных ископаемых, Физическая геохимии, Геохимические методы поисков полезных ископаемых, Экспериментальная геохимия, Термодинамика геохимических процессов, Изотопная геохимия и геохронология и др.

3. Результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников, формируемые (полностью или частично) при реализации дисциплины:

ОПК-4.М Способность применять на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих профиль подготовки

СПК-2.М Способность интерпретировать данные по геохимии изотопов и использовать методы геохронологии для решения геологических задач.

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

знать: теоретические основы, принципы и закономерности фракционирования стабильных изотопов в природных процессах, возможности и ограничения применения стабильных изотопов для корректной интерпретации и понимания геологических процессов, основные методы и подходы для моделирования геохимических процессов с учётом фракционирования стабильных изотопов.

уметь: использовать данные по распределению стабильных изотопов для анализа геолого-геохимической информации, интерпретировать изотопную информацию для целей реконструкции и расшифровки природных геологических процессов, применять изотопные геотермометры.

владеть: навыками работы с изотопными данными и приёмами моделирования геохимических процессов с учётом фракционирования стабильных изотопов, включая поиск и подготовку исходной информации для моделирования, обработку и графическое отображение результатов моделирования.

4. Формат обучения – лекционные и семинарские занятия.

5. Объем дисциплины (модуля) составляет **2** з.е., в том числе **26** академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (**13** часов – лекции, **13** часов – занятия семинарского типа), **46** академических часа на самостоятельную работу обучающихся. Формы текущего контроля - дискуссии, устные опросы. Форма промежуточной аттестации – зачет.

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Анализируются основные процессы фракционирования стабильных изотопов, рассматриваются особенности изотопных химических реакций, вводятся и обсуждаются величины для описания фракционирования стабильных изотопов. Рассматриваются кинетические и термодинамические изотопные эффекты и особенности их проявления в природных процессах. Обсуждается выполнение изотопного масс-баланса для закрытых систем, рассматривается изотопный аспект процесса Рэлеевской дистилляции для открытых систем. Изучается термодинамика процессов изотопного обмена и рассматриваются методы определения равновесных изотопных факторов: коэффициентов фракционирования изотопов и бета-факторов и особенности применения изотопных геотермометров. Подробно изучаются процессы фракционирования изотопов водорода в различных геологических средах. Исследуются процессы фракционирования изотопов водорода в процессах испарения и конденсации, обсуждается линия фракционирования метеорных вод Крэйга и её применение для оценки генезиса рудообразующего флюида. Рассматриваются изотопные эффекты кислорода, особенности распределения изотопов кислорода в оболочках Земли. На примере изотопов кислорода рассматриваются масс-зависимые и масс-независимые эффекты. При изучении фракционирования изотопов углерода особое внимание уделяется фракционированию изотопов при фотосинтезе и природе биологического фракционирования. Фракционирование изотопов между сульфатной и сульфидной серой рассматривается как процесс, определяющий диапазон изотопных вариаций ^{34}S в природных процессах. Масс-независимые эффекты ^{33}S в архейских и раннепротерозойских породах изучаются с точки зрения присутствия восстановительной атмосферы на ранней Земле. Особенности фракционирования т.н. «нетрадиционных» изотопов рассматриваются на примере изотопов железа. Вариации изотопов ртути рассматриваются как результат ядерно-спиновых изотопных эффектов. Фракционирование изотопов, вызванное размером и формой ядра изучается на примере необычной зависимости изотопных эффектов урана от окислительного состояния.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы <i>(виды самостоятельной работы – эссе, реферат, контрольная работа и пр. – указываются при необходимости)</i>
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы				
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Раздел 1. Распространённость изотопов в природе. Основные понятия геохимии стабильных изотопов.		1		1	2	Собеседование, 2 часа
Раздел 2. Процессы фракционирования стабильных изотопов.		2		2	4	Собеседование, 6 часов
Раздел 3. Термодинамика изотопного обмена.		3		3	6	Собеседование, 10 часов
Раздел 4. Методы определения равновесных изотопных факторов		2		2	4	Собеседование, 8 часов
Раздел 5. Изотопные эффекты отдельных элементов: водород, углерод, кислород, сера.		3		3	6	Собеседование, 8 часов
Раздел 6. Геохимия «нетрадиционных» изотопов: изотопы железа, ртути урана		2		2	4	Собеседование, 8 часов
Промежуточная аттестация <i>зачет</i>						4
Итого	72			26		46

Содержание разделов дисциплины:

Распространённость изотопов в природе. Основные понятия геохимии стабильных изотопов.

Понятие изотопа, массы изотопов, дефект массы. Примеры изотопных реакций.

Изотопный состав, способы описания изотопного состава, δ -обозначения изотопные стандарты, вариации изотопного состава. Коэффициент фракционирования изотопов, изотопный сдвиг.

Процессы фракционирования стабильных изотопов.

Кинетические и термодинамические (равновесные) изотопные эффекты. Кинетические коэффициенты изотопного фракционирования. Равновесные коэффициенты фракционирования изотопов. Изотопный масс-баланс. Фракционирование изотопов в процессе Рэлеевой дистилляции на примере системы жидкость-пар. Влияние условий протекания процесса испарения – конденсации на наблюдаемый изотопный эффект. Изменение изотопного состава продуктов и реагентов в ходе химической реакции. Определение изотопного эффекта реакции по изотопному составу остаточных реагентов и/или изотопному составу продуктов реакции и степени завершённости реакции.

Термодинамика изотопного обмена.

Коэффициент фракционирования изотопов и константа реакции изотопного обмена, соотношение между ними. Понятие β -фактора. Понятие статистической суммы. Применение метода Гиббса к расчёту β -фактора двухатомной молекулы для модели гармонический осциллятор – жёсткий ротатор. Расчёт β -факторов многоатомной молекулы. Квантовая природа равновесного фракционирования стабильных изотопов. Температурная зависимость β -факторов кристаллов. Масс-зависимые и масс-независимые изотопные эффекты.

Методы определения равновесных изотопных факторов

Теоретические методы расчётов. Понятие о расчётах «из первых принципов».

Лабораторные методы оценки равновесных изотопных факторов. Метод приближения к изотопному равновесию с двух сторон. Метод частичного изотопного обмена Норттропа-Клейтона. Трёхизотопный метод. Возможные ошибки при определении равновесных изотопных факторов в лабораторных условиях.

Эмпирические методы коэффициентов изотопного фракционирования. Трудности эмпирической оценки.

Изотопные эффекты отдельных элементов: водород, углерод, кислород, сера.

Изотопные эффекты водорода.

Пробоподготовка к изотопному анализу водорода. Изотопные стандарты водорода. Фракционирование изотопов водорода в системе вода-пар, точка инверсии. Глобальный тренд изотопного состава водорода и кислорода метеорных вод. Зависимость Крэйга. Фракционирование изотопов водорода между молекулярными флюидами. Фракционирование изотопов водорода между минералами и водой: солевой эффект; влияние давления. Изотопный состав и генезис рудных флюидов. Вариации изотопного состава метеорных вод в процессах испарения-конденсации. Изотопный состав водорода в мантийном веществе.

Изотопные эффекты кислорода.

Пробоподготовка к изотопному анализу кислорода. Изотопные стандарты кислорода. Фракционирование изотопов кислорода в системе вода-пар. Изотопные эффекты в давлении насыщенного пара. Солевой эффект при фракционирования изотопов кислорода в системе минерал-вода. Изотопные эффекты в системе $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Фракционирование изотопов кислорода между минералами, геотермометрия. Изотопные эффекты кислорода при взаимодействии флюид – порода. Моделирование процессов изотопного фракционирования. Фракционирование изотопов кислорода в магматических процессах. Изотопы кислорода в мантии. Фракционирование изотопов кислорода в атмосферных процессах. Изотопный состав кислорода в океане и пресноводных бассейнах. Изотопы кислорода в космических объектах. Масс-независимое фракционирование изотопов кислорода в хондритах. Фотоэкранирование.

Изотопные эффекты углерода.

Пробоподготовка к изотопному анализу углерода. Изотопные стандарты углерода.

Основные процессы фракционирования изотопов углерода. Геотермометр кальцит-графит. Изотопные эффекты фотосинтеза. C₃ и C₄ растения Фракционирование в циклах Кальвина и Хетч-Слека. Межмолекулярные и внутримолекулярные изотопные эффекты. Биологическое фракционирование изотопов. Изотопный состав углерода нефтей и природного газа. Изотопный состав углерода мантии. Алмазы еридитового и эклогитового парагенезисов. Есть ли углерод в ядре Земли и какой его изотопный состав?

Изотопные эффекты серы.

Пробоподготовка к изотопному анализу серы. Изотопные стандарты серы. Фракционирование изотопов серы в ходе сульфатредукции. Биологическая и термохимическая сульфатредукция. Равновесное фракционирование изотопов серы. Фракционирование между сульфатом и сульфидами. Масс-независимое фракционирование ³³S в архейское и раннепротерозойское время. Древняя восстановленная атмосфера Земли.

Геохимия «нетрадиционных» изотопов: изотопы железа, ртути урана

Пробоподготовка к изотопному анализу железа. Изотопные стандарты железа. Оценка равновесных изотопных факторов железа γ -резонансными методами. Равновесное фракционирование изотопов железа и окислительное состояние. Фракционирование изотопов железа при ультравысоких давлениях. Фракционирование изотопов железа на границе ядра и мантии. Изотопные вариации железа в космических объектах.

Изотопные эффекты ртути. Ядерно-спиновый изотопный эффект. Фракционирование изотопов ртути в атмосфере в фотохимических реакциях. Проявление ядерно-спинового изотопного эффекта в радикальных реакциях. Фракционирование изотопов ртути в пищевых цепях.

Изотопные эффекты урана. Влияние формы и размера ядра на фракционирование изотопов урана. Зависимость распределения изотопов урана от окислительного состояния вещества.

Рекомендуемые образовательные технологии

При реализации программы дисциплины «Геохимия стабильных изотопов» используются следующие технологии. При проведении занятий применяется компьютерная графика (ПК и компьютерный проектор), разбор примеров применения методов компьютерного моделирования при решении различных задач изотопной геохимии, а также – интерактивная форма занятий в виде деловых игр на конкретном материале. При проведении занятий используется компьютерный класс кафедры геохимии.

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Задания для самостоятельной подготовки студентов. Типовые упражнения и расчетные задания.

При проведении самостоятельной работы предполагается обработка результатов расчетов, выполненных при проведении семинарских занятий, и подготовка сообщений о свойствах исследованных систем.

Тематика заданий для самостоятельной работы

1. Оценка изменений изотопного состава связь между отношением изотопов их распространённостью и величинами δ
2. Расчёт изменения изотопного состава в ходе протекания реакции. Восстановление величины изотопного эффекта по изотопному составу продуктов и реагентов.
3. Масс-балансовые расчёты изотопных эффектов
4. Расчёт фракционирования изотопов в ходе Рэлеевской дистилляции. Влияние условий протекания процесса на наблюдаемый изотопный эффект

5. Расчёт β -факторов молекул по результатам решения задачи о молекулярных колебаниях.
6. Оценка изотопного равновесий в системе.
7. Использование изотопных геотермометров. Оценка точности расчёта температур.
8. Применение глобального тренда изотопного состава водорода и кислорода метеорных вод для оценки генезиса рудных флюидов.
9. Расчёт коэффициента равновесного фракционирования по результатам экспериментов по изотопному. Метод Нортропа-Клейтона.
10. Оценка влияния контаминации корового вещества по изотопному составу водорода и серы в изменённых базальтах.
11. Расчёты внутри- и межмолекулярных изотопных эффектов с использованием метод изотопических чисел связей.
12. Расчёты β -факторов железа по данным мессбауэровской спектроскопии.
13. Расчёты β -факторов железа по результатам экспериментов по неупругому γ -резонансному рассеянию.

7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации:

1. Понятие изотопа. Распространённость изотопов. Распределение нейтронов и протонов в ядрах. Дефект массы.
2. Изотопные реакции. Понятие реакций изотопного обмена. Понятие изотопного состава.
3. Коэффициент разделения изотопов. Изотопный сдвиг.
4. Кинетический и термодинамический (равновесный) изотопные эффекты.
5. Рэлеевская дистилляция
6. Изотопный масс-баланс.
7. Фракционирование изотопов при испарении. Формула (без вывода) и её интерпретация.
8. Термодинамика изотопного обмена. Связь коэффициента разделения и константы равновесия изотопного обмена.
9. Понятие β -фактора.
10. Методы определения равновесных изотопных факторов.
11. Теоретический расчёт для двухатомной молекулы.
12. Масс-зависимые изотопные эффекты.
13. Явная зависимость β -фактора от разности масс изотопов (без вывода).
14. Понятие о масс-независимых изотопных эффектах.
15. Кинетика изотопного обмена
16. Метод Нортропа-Клейтона для экспериментального определения констант равновесия изотопов.
17. Трёх-изотопный метод.
18. Фракционирование изотопов водорода в системе вода-пар.
19. Зависимость Крэйга между δD и $\delta^{18}O$ для метеорных вод.
20. Масштаб фракционирования изотопов водорода.
21. Понятие солевого эффекта и примеры.
22. Влияние давления на водородный β -фактор воды.
23. Фракционирование изотопов водорода в системе брусит-вода с учётом давления.
24. Изотопный состав рудных флюидов.
25. Магматический флюид и метаморфический и их изотопные составы.
26. Метеорные воды. Изотопный состав осадков.
27. Кривая Крэйга. Причины отклонения метеорных вод от зависимости Крэйга.
28. Пластовые воды. Изотопный состав.
29. Изотопный состав водорода в мантийных минералах.
30. Распространённость изотопов кислорода. Стандарты.
31. Метод фторирования, использование лазера.

32. Изотопный состав кислорода мантии. Существует ли гетерогенность мантии?
33. Пробоподготовка карбонатов.
34. Методы проподготовки сульфатов и фосфатов.
35. Солевой эффект и его влияние на фракционирование водорода между раствором и минералом.
36. Изотопные эффекты кислорода в системе CO₂-вода. Зависимость от pH.
37. Кислородная геотермометрия.
38. Изотопные эффекты кислорода при взаимодействии флюид-порода.
39. Изотопные эффекты кислорода в магматических породах.
40. Фракционная кристаллизация.
41. Изотопные эффекты кислорода. Плутонические и вулканические породы. Причины различий.
42. Изотопные эффекты кислорода. Базальты.
43. Изотопные эффекты кислорода. Цирконы.
44. Изотопные эффекты кислорода. Атмосферный кислород. Эффект Доула.
45. Изотопные эффекты кислорода. O₂ в морской воде.
46. Изотопные эффекты кислорода. O₂ в пресной воде.
47. Изотопные эффекты кислорода. Океаническая вода.
48. Масс-независимые эффекты в кислороде.
49. Нелинейные эффекты.
50. Масс-независимые эффекты в метеоритах. Самоэранирование.
51. Основные процессы фракционирования изотопов углерода.
52. Изотопные эффекты углерода с участием карбонатов.
53. Углеродные изотопные эффекты фотосинтеза.
54. Фракционирование изотопов углерода растениями C₃ и C₄.
55. Понятие о внутримолекулярных изотопных эффектах.
56. Внутримолекулярные изотопные эффекты в аминокислотах.
57. Углеродные изотопные различия между фракциями живого ОВ.
58. Изотопный состав углерода мантии.
59. Изотопный состав алмазов.
60. Общий изотопный масс-баланс углерода.
61. Изотопный состав наземного и морского ОВ.
62. Изотопный состав природного газа.
63. Общая характеристика изотопов серы. Пробоподготовка. Стандарты.
64. Фракционирование изотопов серы при микробиологической сульфатредукции.
65. Фракционирование изотопов серы при термохимической сульфатредукции.
66. Равновесное фракционирование изотопов серы.
67. Δ³³S в архее.
68. Изотопы железа общая характеристика.
69. Определение δ-факторов железа γ-резонансными методами. Мессбауэровская спектроскопия.
70. Закономерности во фракционировании изотопов железа.
71. Определение δ-факторов железа с помощью неупругого ядерного γ- резонансного рассеяния
72. Почему фракционирование изотопов железа зависит от окислительного состояния.
73. Равновесное фракционирование изотопов железа в сульфидах. Проблема "лёгкого" пирита.
74. Фракционирование изотопов железа в гидротермальных условиях на примере чёрных курильщиков.
75. Изотопные эффекты железа в палласитах.
76. Фракционирование изотопов железа в условиях сверхвысоких давлений (ядро-мантия).
77. Разница в составе базальтов Земли, Луны, Марса, Весты. Интерпретация.
78. Масс-независимое фракционирование, обусловленное размерами и формой ядра на примере изотопов урана.

79. Ядерно-спиновый изотопный эффект и фракционирование изотопов ртути.

8. Ресурсное обеспечение:

А) Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

1. Hoefs J. Stable isotope geochemistry Springer 2015.
2. Z.Sharp Principles of stable isotope geochemistry. Pearson Education, Inc. 2007
3. W. M. White Isotope geochemistry. Willey Blackwell 2015.
4. M. Wolfsberg, W.A. Van Hook, P.Paheth, L.P.N. Rebelo Isotopes effects in chemical, geological and bio sciences. Springer 2010.
5. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М. Недра. 1974.
6. Галимов Э.М. Природа Биологического фракционирования М. Наука. 1981.
7. Бучаченко А.Л. Новая изотопия в химии и биохимии. М. Наука 2007.
8. Гриненко В.А., Гриненко Л.Н. Геохимия изотопов серы. М. Наука, 1974.

дополнительная литература:

1. Bigeleisen J., Göppert-Mayer M. (1947) Calculation of equilibrium constants for isotope exchange reactionsю J. Chem. Phys. V.15. P. 261 - 267. 1947.
2. Urey H.C. The thermodynamic properties of isotopic substancesю . Chem. Soc. (London) P. 562 – 581 194).
3. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000, 304 с.
4. Reviews in mineralogy. Stable isotope geochemistry. V15 1986.
- 5 Reviews in mineralogy and geochemistry. Stable isotope geochemistry. V.43. 2001.
6. Reviews in mineralogy and geochemistry. Geochemistry of non-traditional stable isotope V.55. 2001.
7. Reviews in mineralogy and geochemistry. Non-Traditional Stable Isotopes: Retrospective and Prospective V. 82.

Б) Перечень лицензионного программного обеспечения Microsoft Office Excel, Microsoft Office PowerPoint (при необходимости).

В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

Г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (лицензионное программное обеспечение не требуется): пакет программ Isoplot

Д) Материально-технического обеспечение: лекции и семинары проводятся в компьютерном классе на 6-7 мест.

9. Язык преподавания – русский.

10. Преподаватель (преподаватели) – Поляков В.Б.

11. Автор (авторы) программы – Поляков В.Б., Борисов М.В.